

# 歴史地震の震度と統合的なSPGAモデルの作成事例

野津 厚<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

著者らはこれまで、海溝型巨大地震による強震動の波形、スペクトルなどを高精度で再現できる震源モデルとしてSPGAモデルの開発を行ってきた。このモデルを、歴史地震の再来を想定した被害予測などに適用する場合には、歴史地震の震度データを満足するように震源モデルの作成を行うことが望ましい。そこで本研究では、そのような事例として、1703年元禄地震の震度分布を満足するようなSPGAモデルを作成することを試みた。個々のSPGAのパラメータは経験式から初期値を設定し、震度データの再現状況を見ながら調整した。その結果、3つのSPGAを含む震源モデルにより概ね震度データを説明することができた。

**Key Words :** SPGA model, subduction earthquake, historical earthquake, seismic intensity

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、規模の大きい海溝型地震を対象とする強震動評価が以前にも増して重要となってきた。その際に用いる震源モデルは、既往の強震記録を通じて、海溝型地震への適用性が検証されたものでなければならない。

著者らはこれまで、海溝型巨大地震による強震動の波形、スペクトルなどを高精度で再現できる震源モデルとしてSPGAモデル<sup>1)2)3)4)</sup>の開発を行ってきた。ここにSPGAモデルとは、海溝型地震に特徴的な強震動パルスを再現するため、パルスの幅と調和的なサイズのサブイベント（これをStrong-motion Pulse Generation Area, SPGAという）を用いて構成した震源モデルのことである。これまでに我が国周辺で発生し、かつ、強震記録の得られている海溝型巨大地震（あるいはそれよりやや規模の小さい地震）として、2011年東北地方太平洋沖地震の他に、2003年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震、1968年十勝沖地震などがあるが、それらのいずれについても、SPGAモデルを用いることにより、波形、スペクトルなどを高精度で再現できることを確認している<sup>4)</sup>。このことを受け、著者らは、SPGAモデルの予測問題への適用に関する検討を始めている<sup>例えば5)</sup>。

さて、海溝型巨大地震を対象として強震動評価を実施するとき、歴史地震を上回る規模の地震を対象とすることも多くなってきている<sup>例えば6)</sup>。しかしながら、歴史地

震の再来を想定して被害予測などを行うケースは今後も少なくないものと考えられる。例えば、相模トラフを対象とした場合には、1703年元禄地震や1923年関東地震の再来を想定するケースが考えられる。こうした、歴史地震の再来を想定するケースでは、震度分布<sup>例えば7)</sup>と整合するように震源モデルの作成を行うことが望ましい。これまでのところ、震源モデルを構成するサブイベントとしてSPGAを用い、かつ、歴史地震の震度分布を満足するような震源モデルを作成した事例が無かったので、本研究では、そのような最初の事例として、1703年元禄地震の震度分布を満足するようなSPGAモデルを作成することを試みる。

## 2. 震度データ

本章では、本研究でターゲットとする震度データについて説明する。

1703年元禄地震の震度データは宇佐美<sup>7)</sup>によりまとめられており、神田・武村<sup>8)</sup>はこれに基づいて、短周期地震波発生域を求めめるための震度インバージョンを実施している。図-1は神田・武村の論文をもとに作成した1703年元禄地震の震度分布図である。図に示すように、相模湾沿岸や千葉県館山付近に特に震度の大きい領域が広がっていることがわかる。本研究でターゲットとしたのは基本的にはこの震度分布である。しかしながら、元禄

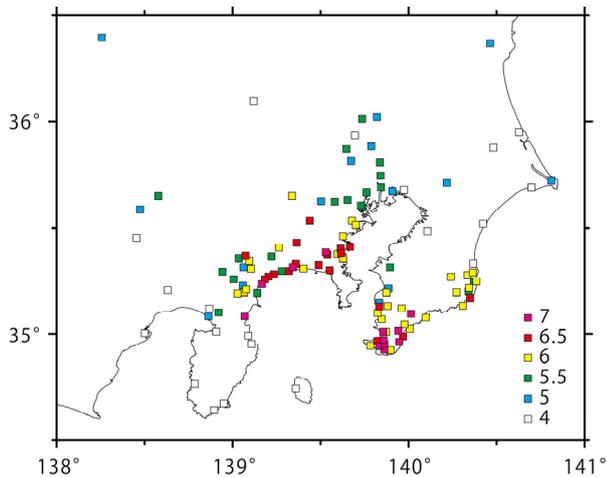


図-1 1703年元禄地震の震度分布  
(神田・武村<sup>8)</sup>の論文をもとに作成)

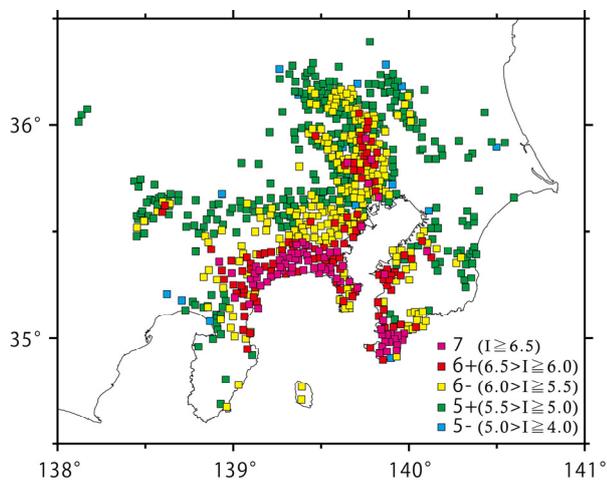


図-2 1923年関東地震の震度分布  
(神田・武村<sup>8)</sup>の論文をもとに作成)

地震は江戸時代前半の地震であるため、その後が発生した地震と比較すると情報量が少ない。例えば、同じ相模トラフを震源とする1923年関東地震については、図-2に示すように、情報量ははるかに豊富なものとなっている。

図-1と図-2を比較すると、元禄地震においてあまり大きな震度が記録されていない地域においても、関東地震において大きな震度が記録されている場合がある。例えば三浦半島や千葉県の木更津付近、東京の低地や甲府盆地などである。これらについては、実際に元禄地震の際にこれらの地域において大きな震度が生じていなかった可能性も否定できない。しかしながら、関東地震よりも元禄地震の方がやや規模が大きい地震であることを考慮すると、実際には大きな震度が発生していたが、それを示す資料が残されていないだけという可能性も考えられる。そこで、本研究では、元禄地震よりも関東地震においてより大きな震度データが示されている地域については、元禄地震においても同等の揺れが生じていたものと考えて以後の研究を進めた。

### 3. 震源モデルの作成方法

本研究で採用した震源モデルの作成方法について以下に述べる。

#### (1) SPGAの個数

まず、設定するSPGAの数について検討を行う。

1923年関東地震についてはWald and Somerville<sup>9)</sup>により遠地実体波と地殻変動データを用いた解析が行われており、震央付近（神奈川県北西部）と三浦半島付近の2箇所にすべりの大きい領域を有するすべり分布が得られている。Sato et al.<sup>10)</sup>の解析でもほぼ同様の場所にすべりの大きい領域が得られている。一方、神田・武村の震度インバージョン解析<sup>8)</sup>では、1923年関東地震に対しては、すべりの大きい2箇所の領域に対応して、2箇所の短周期地震波発生域が求められており、それぞれ、すべりの大きい領域よりも南東側となっている（すべりの大きい領域と短周期地震波発生域の位置の違いについては文献8)の中で考察が行われている）。また、1703年元禄地震に対しては、1923年関東地震の短周期地震波生成域に対応する領域だけでなく、外房の勝浦付近にも短周期地震波発生域が求められている。

一方、著者らは、海溝型地震の地震全体の規模とSPGAの諸量との関係に関する経験式を提案している<sup>11)</sup>。この中で、SPGAの個数と地震全体の規模との関係式として次式が示されている。

$$\log_{10}(\text{SPGAの個数}) = 0.5 M_w - 3.55 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (1)$$

元禄地震の地震モーメントを $M_w = 8.2$ として（笠原のモデル<sup>12)13)</sup>において剛性率を $4.0 \times 10^{10} \text{Nm}$ とすると $M_w = 8.2$ が得られる）式(1)に代入すると、SPGAの個数は3個～4個となる。これらのことを総合的に考慮し、元禄地震の震源モデルは3個のSPGAで構成することとした。

このうち2つは1923年関東地震の震源域に含まれる神奈川県西部と三浦半島付近に置くこととしたが、すべりの大きい領域<sup>9)10)</sup>に置くか、それとも短周期地震波発生域<sup>8)</sup>に置くかという選択肢がある。この点については震度データの再現状況を見ながら決定した（後述）。また、残りの1つは1703年元禄地震だけに見られる外房の勝浦付近の短周期地震波発生域<sup>8)</sup>に置いた。

#### (2) 個々のSPGAのパラメタ

各々のSPGAのパラメタは、文献11)の経験式から初期値を設定し、震度データの再現状況を見ながら調整するという方針で設定した。

文献11)では、地震全体の規模とSPGAの地震モーメント $M_{\text{SPGA}}$ （文献11)では低周波レベルと呼んでいる）の総

和との関係式として次式が示されている。

$$\log_{10}(M_{\text{SPGA}} \text{の総和}) = 1.5 M_w + 8.0 \quad (M_w \leq 7.9) \quad (2)$$

$$\log_{10}(M_{\text{SPGA}} \text{の総和}) = 19.9 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (3)$$

式(2)(3)に $M_w = 8.2$ を代入すると、SPGAの地震モーメントの総和は $7.9 \times 10^{19}$  Nmとなる。一方、文献11)では、SPGAの地震モーメントの総和のうち、最大のSPGA、第二位のSPGA、三位以下のSPGAが占める割合は平均して56%、25%、19%である。これを利用して、各SPGAの地震モーメントの初期値を表-1の通り定めた。

一方、文献11)では、地震全体の規模とSPGAの高周波レベル $A_{\text{SPGA}}$ の総和との関係式として次式が示されている。

$$\log_{10}(A_{\text{SPGA}} \text{の総和}) = 0.5 M_w + 16.31 \quad (M_w \geq 7.9) \quad (4)$$

式(4)に $M_w = 8.2$ を代入すると、SPGAの高周波レベルの総和は $2.57 \times 10^{20}$  Nm/s<sup>2</sup>となる。一方、文献11)では、SPGAの高周波レベルの総和のうち、最大のSPGA、第二位のSPGA、三位以下のSPGAが占める割合は平均して74%、58%、35%である（高周波成分はランダムサンメーションとなるので、これらの割合を足しても100%にならないことに注意されたい。自乗和が100%となる）。これを利用して、各SPGAの高周波レベルの初期値を $1.90 \times 10^{20}$  Nm/s<sup>2</sup>、 $1.49 \times 10^{20}$  Nm/s<sup>2</sup>、 $0.88 \times 10^{20}$  Nm/s<sup>2</sup>とした。

各SPGAの地震モーメントと高周波レベルから式(5)によりコーナー周波数 $f_c$ を求め、Brune<sup>14)15)</sup>の式(6)によりSPGAの面積 $S_{\text{SPGA}}$ の初期値を求めた（表-1）。

$$f_c = (A_{\text{SPGA}} / M_{\text{SPGA}})^{0.5} / 2\pi \quad (5)$$

$$S_{\text{SPGA}} = (0.66 V_s / f_c)^2 \quad (6)$$

ここに $V_s$ は震源付近のS波速度であり、3.7km/sとした。神田・武村<sup>8)</sup>による震度インバージョンの結果によると、1703年元禄地震については、最大の短周期地震波発生域は外房の勝浦付近に推定されているので、最大のSPGAを勝浦付近に置いた。ライズタイムについては、SPGAの幅を $4 \times I_r$ で割った値<sup>16)</sup>を用いた。ここに $I_r$ は破壊伝播速度であり、本解析では2.6km/sを用いた。

以上のようにSPGAのパラメタの初期値を設定した後で、以下に述べる方法で地震動の計算を行い、その結果に基づいて各SPGAのパラメタの調整を行った。その際、破壊フロントは1923年関東地震の震央から $I_r = 2.6$ km/sで同心円状に拡大するものとした。

### (3) 地震動の計算

地震動を計算する地点としては、神奈川県14箇所、

表-1 調整前および調整後のSPGAのパラメタ

	SPGA1	SPGA2	SPGA3
場所	震央付近	三浦半島	外房
初期値	Moment $2.0 \times 10^{19}$ Nm Area $5.6 \times 5.6$ km <sup>2</sup> Rise time 0.54 s	Moment $1.5 \times 10^{19}$ Nm Area $6.4 \times 6.4$ km <sup>2</sup> Rise time 0.62 s	Moment $4.4 \times 10^{19}$ Nm Area $7.4 \times 7.4$ km <sup>2</sup> Rise time 0.71 s
調整後	Moment $1.6 \times 10^{19}$ Nm Area $4.5 \times 4.5$ km <sup>2</sup> Rise time 0.43 s	Moment $1.5 \times 10^{19}$ Nm Area $6.4 \times 6.4$ km <sup>2</sup> Rise time 0.62 s	Moment $2.0 \times 10^{19}$ Nm Area $7.4 \times 7.4$ km <sup>2</sup> Rise time 0.71 s

東京都の21箇所、埼玉県の14箇所、千葉県の26箇所、静岡県12箇所、山梨県の11箇所、合計98箇所のK-NET観測点<sup>17)</sup>とした。計算の対象とした地点については後に4.において震度分布とともに示す。

地震動の計算には、これまで著者らがSPGAモデルの構築に利用してきたものと同じ、経験的サイト増幅・位相特性を利用した強震動評価手法<sup>18)19)</sup>を用いた。伝播経路のQ値は佐藤・巽<sup>20)</sup>による東日本海溝型のQ値を用いた。サイト増幅特性は経験的に得られたもの<sup>21)</sup>を用いた。位相特性の評価のための中小地震記録としては、2012年1月28日7:43に発生した山梨県東部・富士五湖の地震( $M_j 5.4$ )の記録を用いた。

また、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮するため、非線形パラメタを用いてグリーン関数を補正する簡便な方法<sup>22)</sup>を用いた。この方法では、堆積層における平均的なS波速度の低下率を表すパラメタである $v_1$ と、堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメタである $v_2$ が必要となる。このうち $v_1$ については、最大速度から $v_1$ を推定するための経験式<sup>23)</sup>が提案されている。これを式(7)に示す。

$$v_1 = 1 / (1 + 0.0082 PGI) \quad (7)$$

ここにPGIは地動最大速度(cm/s)である。一方、 $v_2$ については、Hardin-Drenevichモデル<sup>24)</sup>における減衰定数の扱いを参考に、式(8)により設定した。

$$v_2 = h_{\text{max}} (1 - v_1^2) \quad (8)$$

式(8)で $v_1$ に自乗がかかっているのは、地盤のせん断剛性はS波速度の自乗に比例するためである。また、式(8)の $h_{\text{max}}$ については、文献3)におけるMYG004、MYG015、MYGH10、FKS001、FKS005の5地点での強震動シミュレーションに用いられたパラメタを参考に、 $h_{\text{max}} = 0.024$ と

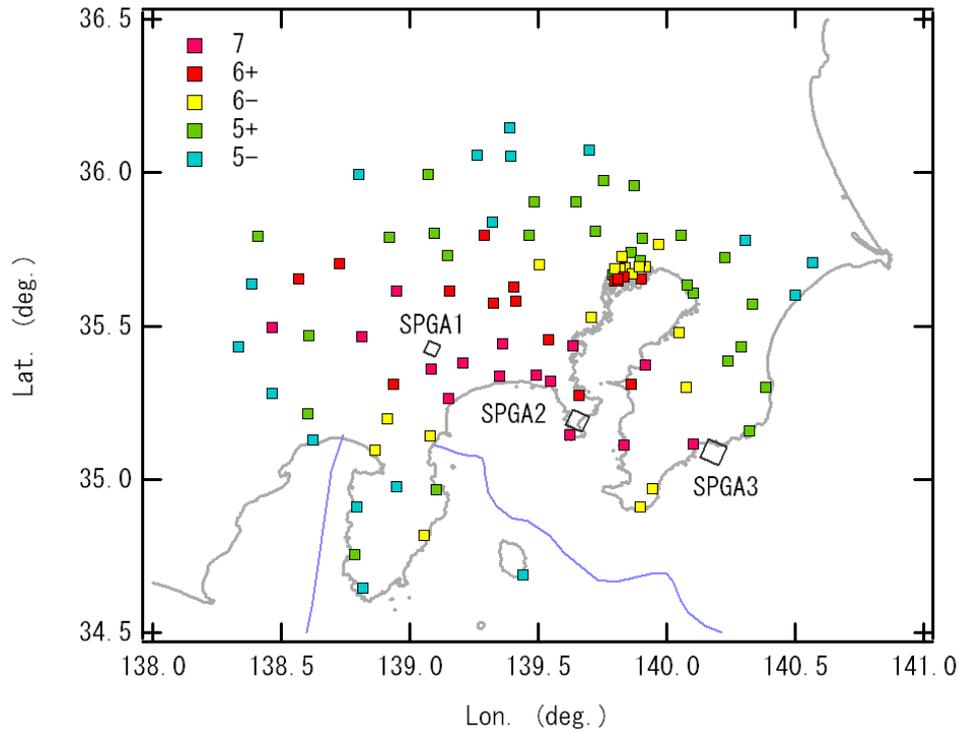


図-3 本研究で作成した1703年元禄地震の震源モデルとそれによる震度分布  
(1923年関東地震のすべり量の大きい領域にSPGA1とSPGA2を置いたケース)

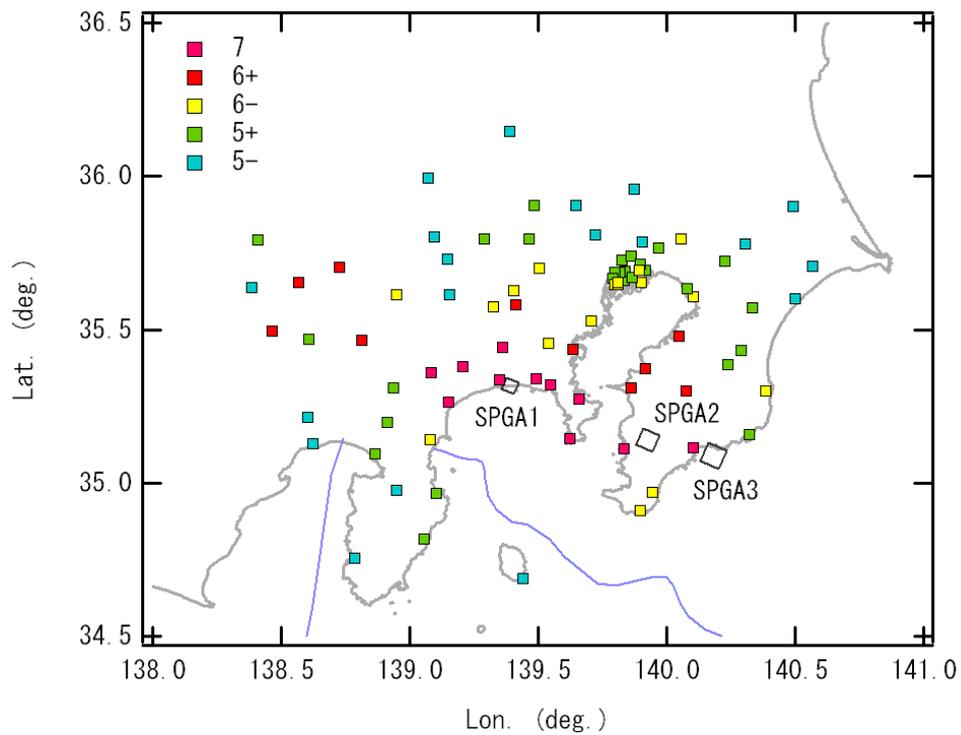


図-4 本研究で作成した1703年元禄地震の震源モデルとそれによる震度分布  
(1923年関東地震の短周期地震波発生域<sup>8)</sup>にSPGA1とSPGA2を置いたケース)

設定した。この方法では、非線形性パラメタの設定が地動最大速度の計算結果に依存しているため、繰り返し計算を行うことが必要になる。そこで、地盤の地震応答計算プログラムSHAKE<sup>29</sup>などを参考に、繰り返し計算を行うためのアルゴリズムを新たに開発した。まず、線形時のパラメタ ( $\nu_1=1$ ,  $\nu_2=0$ ) を初期値として強震動シミュレーションを行い、計算結果の地動最大速度を用いて式(7)(8)により非線形パラメタの値を更新し、再び強震動シミュレーションを行う。このプロセスを、新旧の  $\nu_1$  の誤差が5%以内となるまで繰り返す。ただし、式(7)はデータの存在範囲から  $\nu_1$  が小さい領域では信頼性がないため、 $\nu_1$  が0.84を下回る場合にはそこで繰り返し計算をうち切り、 $\nu_1=0.84$ でのシミュレーション結果を採用する。

以上の方法の妥当性については、今後、より多くのデータを用いて検証を行っていく必要がある。

#### 4. 震源モデルの作成結果

図-3および図-4に今回作成した1703年元禄地震の震源モデルとそれによる震度分布を示す。ここでは二通りのケースについて示しており、図-3が1923年関東地震のすべり量の大きい領域にSPGA1とSPGA2を置いたケース(ケース1)、図-4が1923年関東地震の短周期地震波発生域にSPGA1とSPGA2を置いたケース(ケース2)である。SPGA3の位置は同じである。それぞれ、3箇所のSPGAが黒の長方形で示されている。

まず、ケース1の結果を震度データ(図-1と図-2を併せて考える)と比較すると、神奈川県南部はすべて震度6強以上となっていること、千葉県では内房の木更津付近から館山付近にかけて震度6強以上の領域が広がっていることなどの点で整合性が見られる。また、東京付近では震度5強の地点や震度6弱の地点の他に、おそらく地盤条件の影響で震度6強以上の地点も見られるという点でも、ケース1の結果と震度データとの間に整合性が見られる。

一方、ケース2の結果を震度データと比較すると、神奈川県南部や千葉県の木更津付近から館山付近にかけて震度6強以上の領域が広がっているという点では、ケース1と同様、震度データとの整合性が見られる。しかしながら、ケース2は、東京付近に震度6強以上の領域が表れないという点がケース1と異なっている。この点についてはdirectivityが関係していると考えられる。すなわち、ここで採用している強震動評価手法は破壊伝播を考慮してグリーン関数の重ね合わせを行う方法であるから、directivityが考慮される。ケース1においても、ケース2においても、SPGAの破壊は北西から南東に向

かって進むものとしている。そのため、SPGA1が北西寄りに位置するケース1では東京付近に対して若干forward directivityの影響があるが、SPGA1が南東寄りに位置するケース2では、東京付近はforward directivityの影響を全く受けない。このような違いから、ケース2では相対的に東京付近の震度が小さくなっているものと考えられる。神田・武村<sup>9</sup>の震度インバージョンはdirectivityを考慮しない方法であり、そのことが、短周期地震波発生域の推定結果に影響を与えている可能性は、否定はできないと考えられる。

この他、静岡県東部の御殿場から裾野にかけての震度も、ケース1の方が震度データとより整合的である。

以上の比較は、最初に述べたように「元禄地震よりも関東地震においてより大きな震度データが示されている地域については元禄地震においても同等の揺れが生じていた」との前提に基づくものであるが、この前提に基づく限り、全体として、ケース2よりもケース1の方が、震度データとより調和的な震源モデルであると言える。

#### 5. まとめ

本研究では、1703年元禄地震を対象とし、震源モデルを構成するサブイベントとしてSPGAを用い、かつ、震度データを満足するような震源モデルの作成を行った。個々のSPGAのパラメタは経験式から初期値を設定し、震度データの再現状況を見ながら調整した。その結果、3つのSPGAを含む震源モデルにより概ね震度データを説明することができた。1923年関東地震の震源域に含まれる2つのSPGAについては、1923年関東地震の短周期地震波発生域に置くよりも、すべり量の大きい領域に置く方が、より震度データと調和する結果となった。ただしこの結果は「元禄地震よりも関東地震においてより大きな震度データが示されている地域については元禄地震においても同等の揺れが生じていた」との前提に基づいている。

震度データを満足する震源モデルの作成は、地震毎の個別性も大きいと考えられるが、本研究の事例は一つの参考になるものと考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETのデータを使用しました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 野津厚：海溝型巨大地震の特性化震源モデル作成におけるこつ、日本地震学会講演予稿集, D004, 2006.
- 2) 野津厚：海溝型巨大地震による周期 1-5 秒の帯域の

- 地震動の予測手法について，日本地震学会講演予稿集，B12-04，2010.
- 3) 野津厚：東北地方太平洋沖地震を対象とするスーパーアスペリティモデルの提案，日本地震工学会論文集，Vol.12，No.2，pp.21-40，2012.
  - 4) 野津厚，山田雅行，長尾毅，入倉孝次郎：海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング，日本地震工学会論文集，Vol.12，No.4（特集号），pp.209-228，2012.
  - 5) 野津厚：南海トラフの地震（ $M_w$ 9.0）を対象としたモデルによる強震動評価事例，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻），pp.I-872-I-888，2013.
  - 6) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），2012，[http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai\\_trough/1st\\_report.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/1st_report.pdf)（2012年6月1日閲覧）.
  - 7) 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧[416]-2001，東京大学出版会，2003.
  - 8) 神田克久，武村雅之：震度データから推察される相模トラフ沿いの巨大地震の震源過程，日本地震工学会論文集，Vol.7，No.2（特集号），pp.68-79，2007.
  - 9) Wald,D.J. and Somerville, P.G.: Variable slip rupture model of the Greet 1923 Kanto, Japan, earthquake: geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.159-177, 1995.
  - 10) Sato, H., Hirata, N., Koketsu, K., Okaya, D., Abe, S., Kobayashi, R., Matsubara, M., Iwasaki, T., Ito, T., Iwata, T., Kawanaka, T., Kasahara, K. and Harder, S.: Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, Vol.309, No.5733, pp.337-520, 2005.
  - 11) 野津厚，長尾毅：海溝型巨大地震による地震動の予測のための震源パラメーターの経験式—強震動パルスの生成に着目して—，港湾空港技術研究所資料，No.1257，2012.
  - 12) 笠原慶一，山田重平，安藤雅孝：南関東の地殻変動—展望と作業仮説—，関東大地震 50 周年論文集，pp.103-116，1973.
  - 13) 佐藤良輔編：日本の地震断層パラメーターハンドブック，鹿島出版会，1989.
  - 14) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
  - 15) Brune, J.N.: Correction *J. Geophys. Res.*, Vol.76, p.5002, 1971.
  - 16) 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル 2 地震動の設定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No.25，2003.
  - 17) Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H. and Yamamoto, A.: Recent progress of seismic observation networks in Japan—Hi-net, F-net, K-net and KiK-net—, *Earth Planets Space*, Vol.56, pp.xv-xxviii, 2004.
  - 18) 古和田明，田居優，岩崎好規，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集第514号，pp.97-104，1998.
  - 19) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—，土木学会論文集 A，Vol.65，No.3，pp.808-813，2009.
  - 20) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，556, pp.15-24, 2002.
  - 21) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005.
  - 22) 野津厚，盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震 2，pp.361-374，2003.
  - 23) 若井淳，野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震の際に見られた表層地盤の非線形挙動の概略的傾向，港湾空港技術研究所資料，No.1272，2013.
  - 24) Hardin, B.O. and Drenevich, V.P., Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *Proc. of the American Society of Civil Engineers*, Vol.98, No.SM7, pp.667-692, 1972.
  - 25) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE – A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.

## DEVELOPEMENT OF AN SPGA MODEL FOR THE 1703 GENROKU, JAPAN, EARTHQUAKE ( $M_w$ 8.2) WITH CONSIDERATION OF SEISMIC INTENSITY DATA

Atsushi NOZU

The authors have been developing the SPGA model, which is suitable for the simulation of strong ground motions for subduction earthquakes. When the model is applied to a historical earthquake, it is desirable to construct an SPGA model which is consistent with seismic intensity data. In this study, as an example of the application of the SPGA model to a historical earthquake, an SPGA model was developed for the 1703 Gneroku, Japan, earthquake ( $M_w$ 8.2) taking into account seismic intensity data. The initial model parameters were determined using an empirical equation and they were modified based on the results of strong motion simulation. It was found that a source model with three SPGAs can explain the seismic intensity data.